

## MOVIMIENTO DE FLUIDOS: APLICACIONES AVANZADAS EN INGENIERÍA

MANUEL PÉREZ TELLO

*Los fluidos se encuentran en nuestro alrededor y dentro de nosotros mismos y son importantes tanto en la vida diaria como en los procesos productivos. En este trabajo se explican tres técnicas que representan actualmente tecnologías de punta para el diseño, análisis y optimización de procesos las cuales están siendo estudiadas por el Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad de Sonora.*

*Dr. Manuel Pérez Tello*  
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Química  
y Metalurgia, Universidad de Sonora.  
mperez@iq.uson.mx

Un fluido es cualquier gas o líquido que se encuentre a nuestro alrededor o contenido en un recipiente. El fluido puede ser un compuesto puro, tal como el agua destilada contenida en un garrafón, o bien una mezcla de compuestos, tal como el aire que respiramos, el cual consta mayoritariamente de oxígeno y nitrógeno en una proporción de 21 y 79% volumen, respectivamente.

Los fluidos son importantes tanto en nuestra vida diaria como en los procesos productivos. Algunos gases como el acetileno y el butano se utilizan como combustibles en diversas operaciones, tales como soldadura, sistemas de calefacción de casas, hornos industriales, etcétera. También pueden ser materia prima para producir otras sustancias intermedias, a partir de las cuales se obtienen los plásticos, pinturas, aerosoles, etcetera. El aire es utilizado en los procesos industriales para producir aceros y metales, para el secado de alimentos, entre otros usos.

Los fluidos líquidos juegan también un papel importante. Un buen número de procesos de la industria química y de alimentos incluyen reactores que involucran líquidos. El enfriamiento de los motores de combustión interna se lleva a cabo con aceites de alto peso molecular en forma líquida. Las redes de tuberías de agua y los equipos para su tratamiento involucran el manejo de reactivos líquidos.

## LOS FLUIDOS Y LA INGENIERÍA

La solución de problemas de Ingeniería que involucran fluidos (líquidos o gases) requiere frecuentemente del cálculo de las características de éstos dentro de un equipo o sistema particular. Ejemplos de estas características incluyen la velocidad, temperatura, concentración de ciertas sustancias, esfuerzos de corte en paredes y partes móviles de equipos, etcetera. La determinación de estas características es importante porque permite al ingeniero diseñar, analizar y optimizar equipos y procesos.

El cálculo de estas características involucra la solución de ecuaciones complicadas de la mecánica de fluidos. Hasta hace algunas décadas, la solución de estas ecuaciones para casos prácticos no era posible, sólo se disponía de soluciones aproximadas en forma de gráficas y correlaciones. Con el rápido avance de las computadoras, en la actualidad es posible resolver dichas ecuaciones de manera rigurosa y literalmente visualizar el comportamiento de los fluidos tal como si el analista se encontrara inmerso en el sistema de estudio.

En este artículo se muestran tres ejemplos de estudios computacionales realizados por el autor y sus estudiantes, en los cuales se analiza el movimiento de fluidos: 1) la ventilación en un aula de una escuela primaria; 2) la eliminación de cobre de un suelo contaminado; y 3) el diseño de un proceso para la fabricación de películas de diamante. Finalmente se plantean las perspectivas del estudio de fluidos en movimiento en los próximos años.

## EJEMPLO 1: VENTILACIÓN EN UN AULA DE EDUCACIÓN PRIMARIA

Debido a que el Estado de Sonora se encuentra en una zona cálida seca donde se presentan temperaturas extremas mayores a los 40°C, existe la necesidad de estudiar el comportamiento térmico de los edificios. Esto permitirá el diseño apropiado de sus sistemas de enfriamiento y, consecuentemente, se podrán mejorar las condiciones de confort dentro de ellos, con el consecuente ahorro de energía eléctrica en los mismos.

Uno de los sectores que se ven más afectados por las condiciones extremas en el Estado de Sonora es la población infantil, ya que es una de las más sensibles a las altas temperaturas. En este trabajo [1] se estudió el comportamiento térmico de un aula de clases típica de una escuela primaria de la ciudad de Hermosillo, Sonora, en condiciones de verano. Algunos resultados se muestran en las figuras 1 y 2. En la primera se muestra la velocidad del aire en la cercanía del enfriador evaporativo (cooler). Haciendo uso de la computadora, se analizaron diferentes alternativas de ventilación. Por ejemplo, se consideró el caso cuando todas las ventanas del aula están abiertas y se calculó la distribución de temperaturas que resultaría (figura 2). Los resultados del estudio indicaron, entre otras cosas, que es posible mejorar las condiciones de confort dentro del aula al incrementarse la altura del enfriador y disminuir el flujo de aire de alimentación.

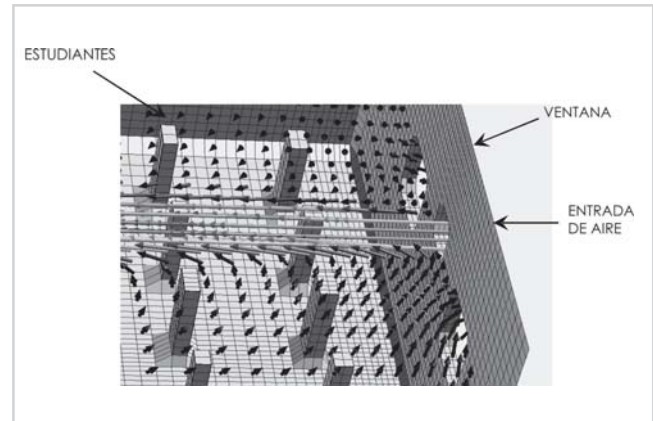


FIGURA 1. Detalle del movimiento del aire en la cercanía del enfriador evaporativo en un aula de educación primaria

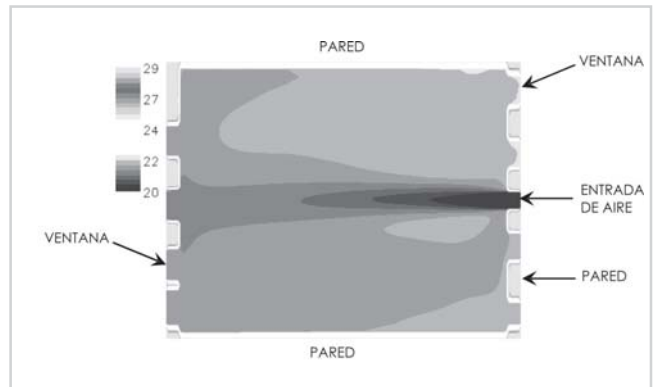


FIGURA 2. Distribución de temperatura del aire a una altura de 1.7 m cuando todas las ventanas están abiertas. La escala en la parte superior izquierda representa la temperatura en grados Centígrados.

## EJEMPLO 2: ELIMINACIÓN DE COBRE DE UN SUELO CONTAMINADO

La contaminación de suelos debido a metales pesados tales como el cadmio, plomo y cobre es un problema a nivel mundial. Nuestro país no es la excepción. Una alternativa para la limpieza de suelos es el proceso de eliminación electrocinética. El fundamento de dicho proceso se muestra en la figura 3. La técnica consiste en inundar el suelo con agua a fin de facilitar la disolución de los compuestos metálicos y formar iones metálicos en solución. Enseguida se insertan electrodos en el suelo y se hace pasar corriente eléctrica directa a través del mismo. Al aplicar el campo eléctrico, los iones metálicos –los cuales típicamente poseen carga positiva- se desplazarán hacia los electrodos con carga eléctrica opuesta, es decir, hacia

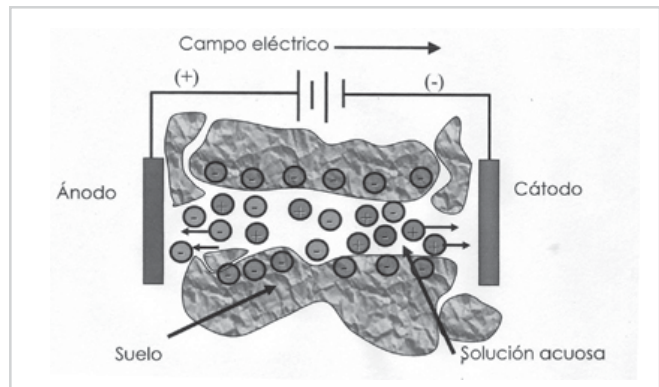


FIGURA 3. Principio de funcionamiento del proceso de eliminación electrocinética. Al aplicar corriente eléctrica, los iones positivos en la solución acuosa, tales como el ion  $\text{Cu}^{+2}$ , tenderán a moverse hacia el cátodo, mientras los iones negativos lo harán hacia el ánodo.

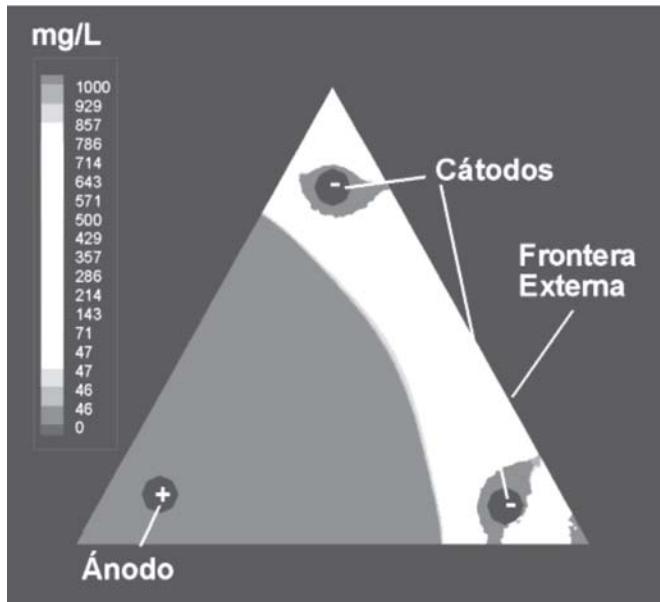


FIGURA 4. Distribución de cobre total en mg/L en un suelo contaminado al cabo de 200 días de operación del proceso de eliminación electrocinética. Nótese la alta concentración de cobre en las cercanías de los cátodos y la baja concentración en el resto del arreglo.

el cátodo. De esta forma, en principio es posible concentrar el metal contaminante en una zona reducida del suelo para su posterior extracción por vía mecánica.

En este laboratorio se adaptó un modelo computacional publicado en la literatura [2] para el caso de la contaminación por compuestos de cobre en un suelo natural del Estado de Sonora. En dicho estudio [3] se analizaron el efecto del voltaje aplicado y la concentración inicial del contaminante sobre la eficiencia del proceso. La figura 4 muestra los resultados de los cálculos realizados para un arreglo de electrodos triangular de 15 m de lado. Una animación de los resultados obtenidos como función del tiempo se encuentra disponible en la página web del autor: [www.mperez.iq.uson.mx](http://www.mperez.iq.uson.mx).

Los resultados de este estudio permitieron establecer criterios para la operación de este proceso en términos del voltaje requerido para la operación, el espaciamiento entre electrodos y el número de los mismos. Asimismo, permitió el diseño de un prototipo a escala de laboratorio en el cual se continuarán los estudios de este proceso a nivel experimental.

### EJEMPLO 3: FABRICACIÓN DE PELÍCULAS DE DIAMANTE

El diamante es un material que a lo largo de la historia ha cautivado a la humanidad debido a sus propiedades físicas y químicas sobresalientes. Es ampliamente reconocido como una piedra preciosa de alto valor económico, pero también se ha incorporado como un material alternativo en diversas aplicaciones industriales.

En la actualidad existen varios usos consolidados para el diamante. Ejemplos de éstos son: como recubrimiento en herramientas de corte, pulido y desgaste; como disipador de calor para diodos láser y circuitos integrados de microondas. Asimismo, se ha propuesto su uso como semiconductor, como recubrimiento de alambres metálicos y fibras no metálicas, así como en la producción de dosímetros de radiación para aplicaciones médicas, gracias a su compatibilidad con el tejido humano.

En la naturaleza, el diamante se encuentra en forma de piedras o polvos, lo que reduce considerablemente el número de aplicaciones posibles. Esto ha conducido a la búsqueda de técnicas alternativas para fabricar diamante sintético. A partir de lo anterior se desarrolló el proceso de deposición química de vapor por filamento caliente (HFCVD por sus siglas en inglés), el cual se muestra esquemáticamente en la figura 5. En este proceso, una mezcla de gases se activa químicamente por medio de un filamento a alta temperatura para producir radicales libres que son especies precursoras de la formación del diamante. Estas especies reaccionan químicamente en el gas y en la superficie de un sustrato, teniéndose como resultado el crecimiento de la película de diamante sobre este último.

La calidad de las películas de diamante producidas mediante el proceso HFCVD depende de un número de factores, tales como la temperatura del sustrato, la naturaleza del material del sustrato, y la composición de la mezcla gaseosa utilizada, entre otros. Una de las limitaciones del proceso consiste en la baja rapidez de deposición del diamante, la cual oscila entre 0.1-10 micras por hora. Adicionalmente, el espesor de la película no es uniforme.

En este laboratorio se desarrolló [4] un modelo computacional para representar un reactor HFCVD, como el mostrado en la figura 5. Una vez que se verificó que dicho modelo reproduce el comportamiento de un reactor real a nivel laboratorio, se realizó un estudio para evaluar el efecto del número de filamentos sobre la eficiencia del proceso, en términos de la temperatura dentro del reactor y la rapidez de crecimiento de la película de diamante, entre otras cosas.

La figura 6 muestra un ejemplo de dichos cálculos, en el cual se muestran los contornos de concentración

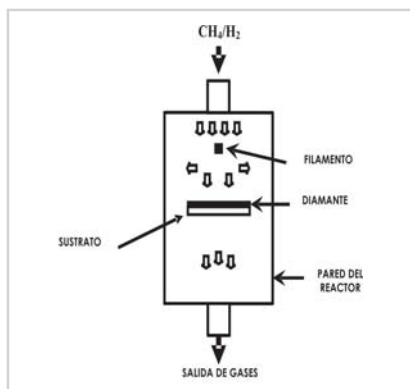


FIGURA 5. Proceso de Deposición Química de Vapor de Filamento Caliente (HFCVD por sus siglas en inglés) para la producción de películas de diamante

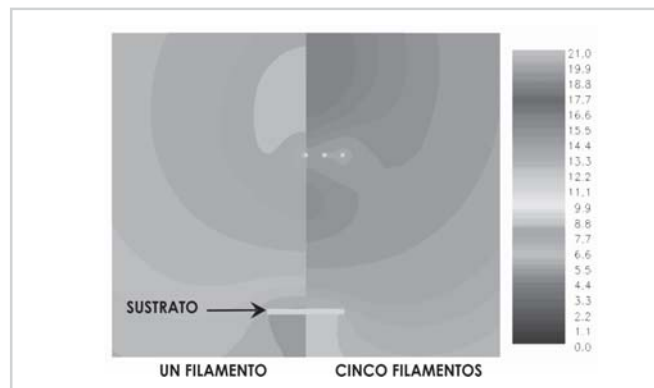


FIGURA 6. Contornos de concentración del radical  $\text{CH}_3$  en la vecindad filamento-sustrato de un reactor HFCVD. La escala en la parte derecha indica los valores en  $10^{13}$  radicales/ $\text{cm}^3$ .

## COMENTARIOS FINALES Y PERSPECTIVAS A FUTURO

Las técnicas utilizadas en los ejemplos anteriormente citados representan actualmente tecnología de punta para el diseño, análisis y optimización de procesos. En la literatura, dichas técnicas se conocen con el nombre genérico de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés). Puesto que los fluidos en movimiento se encuentran prácticamente en nuestro alrededor y dentro de nosotros mismos, la aplicación de las técnicas de CFD aglutina de manera natural el trabajo interdisciplinario de ingenieros, geólogos, químicos, médicos, etcetera, y su campo de acción involucra desde procesos industriales complejos de grandes dimensiones hasta el desarrollo de implantes cardiovasculares. El lector interesado podrá fácilmente verificar lo anterior haciendo una búsqueda en Internet sobre la palabra clave “CFD”. En este contexto, es satisfactorio poder afirmar que en la Universidad de Sonora se cuenta con la infraestructura necesaria y el personal especializado para el desarrollo de esta herramienta, en beneficio de la sociedad del siglo XXI.

## REFERENCIAS

1. F.J. GARCÍA DURAZO, “Análisis del Comportamiento Térmico de un Aula de Educación Primaria Mediante Dinámica de Fluidos Computacional” (Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química, Universidad de Sonora, 2004).
2. R.A. JACOBS, “Two-Dimensional Modeling of Electroremediation,” *American Institute of Chemical Engineers’ Journal*, 42 (6) (1996), 1685-1696.
3. V. RUBIO NIEBLAS, “Modelación Matemática del Proceso de Remoción Electrocinética de Especies Contaminantes en Suelos” (Tesis de Maestría en Metalurgia Extractiva, Universidad de Sonora, 2004).
4. M. OLIVAS MARTÍNEZ, “Modelación Computacional de un Sistema de Deposición Química de Vapor de Películas de Diamante” (Tesis de Maestría en Polímeros y Materiales, Universidad de Sonora, 2006).